

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



БАРАНДИЧ КАТЕРИНА СЕРГІЇВНА

УДК 621.7.015:539.422.24

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ
ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЇХ ТОКАРНОМУ ОБРОБЛЕННІ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Вислоух Сергій Петрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», доцент кафедри виробництва приладів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Марчук Віктор Іванович,
Луцький національний технічний університет,
завідувач кафедри приладобудування


доктор технічних наук, професор
Посвятенко Едуард Карпович,
Національний транспортний університет,
професор кафедри виробництва, ремонту та
матеріалознавства

Захист відбудеться «17» квітня 2018 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корпус №1, ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «____» _____ 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.002.11



О.С. Ганпанцурова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення рівня якості продукції в приладо- та машинобудівній галузях гостро ставить задачу пошуку шляхів забезпечення її надійності. Найбільш розповсюдженою і небезпечною причиною виходу з ладу деталей приладів та машин є втомне руйнування, що нерідко призводить до тяжких наслідків, оскільки виникає раптово. До деталей, які виходять з ладу від втомного руйнування, відносяться вали, шатуни, пальці, шестерні, ротори та їх кріпильні елементи, зубчаті колеса, підшипники, диски та інші, що працюють під дією навантажень змінних за величиною та напрямком. Внаслідок цього в поверхневому шарі таких деталей виникають напруження, що є змінними в часі, і за величиною менші границі міцності. В цьому випадку в макрооб'ємі матеріал деталі деформується пружно. При пружному деформуванні достатньо великого об'єму, в мікрооб'ємах відбувається локальне знакозмінне пластичне деформування, яке називають мікропластичним. Його багаторазове повторення призводить до зародження мікроскопічних тріщин. Поступовий їх розвиток і об'єднання в магістральну тріщину призводить до послаблення перерізу і раптового долому деталей. А у валах та осях при експлуатації, навіть при постійних зовнішніх навантаженнях, виникають знакозмінні напруження згину симетричного циклу, що можуть призвести до їх втомного руйнування.

Відомо, що параметри якості поверхневого шару деталей впливають на їх опір втомі. Основними з цих параметрів є шорсткість, залишкові напруження, деформаційне зміцнення (наклеп), структурно-фазовий склад.

Оскільки при обробленні відповідальних деталей спостерігається тенденція заміни шліфування фінішною обробкою поверхонь точінням, актуальним є розв'язання задачі створення науково обґрунтованої методики технологічного забезпечення необхідних значень циклічної довговічності деталей на основі врахування впливу токарного оброблення на стан поверхневого шару деталей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі виробництва приладів і пов'язана з пошуком шляхів забезпечення експлуатаційних характеристик, якості та надійності приладів, згідно з НДР №2653-п «Розробка ефективних технологій на основі сучасних автоматизованих систем керування якістю виготовлення виробів приладобудування» ДР № 0113U002296.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є технологічне забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі шляхом визначення раціональних режимів токарного оброблення та розробка відповідних методичних рекомендацій.

Для досягнення сформульованої мети вирішено наступні задачі дисертаційного дослідження:

- виконати аналіз параметрів, що характеризують опір втомі деталі при циклічних навантаженнях, та методів визначення циклічної довговічності матеріалу деталі;

- провести експериментальні дослідження параметрів якості поверхневого шару та дослідження на втому зразків за різних режимів їх токарного оброблення;

- розробити математичну модель циклічної довговічності з урахуванням реальних характеристик матеріалу деталі та режимів її токарного оброблення;

- розробити математичну модель процесу фінішного токарного оброблення, що забезпечує необхідну циклічну довговічність деталі при максимальній продуктивності її фінішного токарного оброблення і враховує реальні характеристики матеріалу деталі;

- розробити алгоритм і програму визначення раціональних режимів токарного оброблення деталей, що забезпечують необхідне значення циклічної довговічності матеріалу деталі, за критерієм максимальної продуктивності;

- виконати комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану деталі, що працює в умовах знакозмінних навантажень, та на цій основі визначити раціональний режим її токарного оброблення;

- розробити методичні рекомендації використання результатів дисертаційних досліджень щодо визначення раціональних режимів токарного оброблення та виконати їх практичну апробацію при розв'язанні задач технологічної підготовки виробництва деталей.

Об'єкт дослідження: токарне оброблення деталей, що працюють в умовах змінних навантажень.

Предмет дослідження: вплив технологічних умов токарного оброблення на циклічну довговічність деталей.

Методи дослідження:

- теоретичні основи технології машинобудування, матеріалознавства та опору матеріалів;

- теоретико-експериментальне моделювання циклічної довговічності матеріалу деталей;

- експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів токарного оброблення на стан поверхневого шару та циклічну довговічність деталей;

- кінцево-елементний аналіз напружено-деформованого стану деталі при її експлуатації;

- методи багатовимірного статистичного аналізу при обробці результатів експериментальних досліджень;

- методи математичного програмування та оптимізації при визначенні раціональних режимів оброблення деталей.

Достовірність наукових припущень, положень, висновків і рекомендацій обумовлена коректним використанням фундаментальних законів опору матеріалів, теоретичних основ технології машинобудування та матеріалознавства при задовільному збігу результатів теоретичних і експериментальних досліджень, оброблених з використанням методів багатовимірного статистичного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше отримана теоретико-експериментальна залежність циклічної довговічності деталей на прикладі групи конструкційних легованих сталей від технологічних режимів їх фінішного токарного оброблення, що дозволяє прогнозувати кількість циклів до руйнування деталі при її експлуатації під дією циклічно змінних навантажень.

2. Вперше розроблена математична модель процесу токарного оброблення, використання якої дозволяє визначити оптимальні режими фінішного оброблення, за умови забезпечення необхідної циклічної довговічності деталі при максимальній продуктивності та врахування реальних характеристик її матеріалу.

3. Встановлено закономірність впливу режимів фінішного токарного оброблення на стан поверхневого шару та циклічну довговічність деталей класифікаційної групи легованих хромистих сталей.

4. Розроблена нова методика забезпечення необхідного значення циклічної довговічності матеріалу деталі, шляхом призначення раціональних режимів її фінішного токарного оброблення.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено алгоритми та програми обробки результатів експериментальних досліджень методами багатовимірного статистичного аналізу, що дозволяють використовувати їх при проведенні різноманітних випробувань.

2. Розроблено алгоритм та програму, що дозволяють використовувати результати експериментальних досліджень, які здійснені з одним матеріалом класифікаційної групи, для множини матеріалів даної групи з урахуванням дійсних їх характеристик.

3. Створено алгоритм та програму оптимізації процесу токарного оброблення деталі, що забезпечують необхідну циклічну довговічність деталі при максимальній продуктивності її фінішного токарного оброблення і враховують реальні характеристики матеріалу деталі.

4. Запропоновано режими фінішного токарного оброблення деталі типу «Вал», що забезпечують необхідне значення її циклічної довговічності.

5. Надано практичні рекомендації, щодо використання створеної методики технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності деталей, що працюють в умовах циклічно змінних навантажень.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, які є в дисертації, отримані автором самостійно. Постановка задачі досліджень, розробка методології та підходів до її вирішення здійснювались спільно з науковим керівником. Автору належить розробка розрахунково-експериментального підходу щодо створення математичної моделі циклічної довговічності деталі від режимів токарного оброблення та напруження циклу; створення математичної моделі процесу токарного оброблення, що включає в якості цільової функції продуктивність фінішного токарного оброблення та систему обмежень при розв'язанні задачі технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності деталей; створення методики та проведення експериментальних

досліджень з визначення параметрів шорсткості поверхні, мікротвердості та структурного стану поверхневих шарів зразків. Втомні випробування зразків після їх токарного оброблення виконано спільно з працівниками кафедри динаміки, міцності машин та опору матеріалів маханіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні положення та результати дисертаційної роботи висвітлені на: 12-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів» (Ялта, 2012 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Досягнення молодих вчених в розвитку інноваційних процесів в економіці, науці, освіті» (Брянськ. Росія, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні задачі математичного моделювання та інформаційних технологій» (Сочі, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Майбутній науковець – 2013» (Сєверодонецьк, 2013 р.); 7-й Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування-2014» (Мінськ, 2014 р.); III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Львів, 2015 р.); XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2016 р.); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи» (Київ, 2017 р.); XVII Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Чернігів, 2017 р.).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 23 наукові праці, у тому числі 12 статей у наукових фахових виданнях, з них 3 у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз даних та 2 статті в іноземних виданнях, 2 патенти України на корисну модель, 9 тез доповідей в збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел, що містить 130 найменувань, і додатків. Загальний обсяг роботи становить 204 сторінки машинописного тексту, у тому числі 55 ілюстрацій, 18 таблиць, список використаних джерел на 15 сторінках, 3 додатки на 64 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформовано мету та задачі досліджень, показано наукову новизну та практичну цінність викладених досліджень, наведені відомості про апробацію результатів, публікації та структуру роботи.

В **першому розділі** дисертації представлено аналіз літературних джерел з питань втомного руйнування деталей при експлуатації. Визначено, що найбільш розповсюдженою і небезпечною причиною виходу з ладу деталей машин є втомне руйнування, що нерідко призводить до тяжких наслідків, оскільки

виникає раптово. До деталей, які виходять з ладу від втомного руйнування, відносяться вали, шатуни, пальці, шестерні, ротори центрифуг та їх кріпильні елементи, зубчаті колеса, підшипники, диски та інші, що працюють під дією навантажень змінних за величиною та напрямком, внаслідок чого в них виникають напруження за величиною менші границі міцності та змінні в часі. А у валах та осях при роботі навіть при постійних зовнішніх навантаженнях виникають знакозмінні напруження згину симетричного циклу, що можуть призвести до їх втомного руйнування. Однією з основних характеристик опору втомі деталей є циклічна довговічність, яка дозволяє визначити термін їх безвідмовної роботи.

Аналіз досліджень з питань втомного руйнування деталей показав, що найбільший вплив на опір втомі деталі мають її абсолютні розміри, концентрація напружень, зовнішнє середовище, частота змінних напружень та стан поверхні. Вплив якості поверхневого шару на опір втомі пояснюється механізмом втомного руйнування, в основі якого лежить утворення і розвиток в процесі циклічного навантаження мікротріщин втоми. Це узгоджується з основними положеннями теорії опору матеріалів. Тому необхідний ретельний аналіз впливу стану поверхневого шару та визначення найбільш інформативних показників.

Питання впливу технологічних умов механічного оброблення на параметри якості поверхневого шару та експлуатаційні характеристики матеріалу деталей розглядали багато вчених. Насамперед це – А.Г. Суслов, В.Ф. Без'язичний, Т.Д. Кожина, А.М. Сулима, С.С. Сілін, Е.В. Рижов, В.П. Федоров, С.С. Філін, М.А. Єлизаветін, М.И. Євстигнєєв, С.А. Урядов, А.Л. Водолагін, В.Т. Трощенко, Г.В. Карпенко, В.І. Марчук, Ataollah Javidi, A. Pramanik, A.R. Dixit, S. Chattopadhyaya, M.S. Uddin, Yu Dong, A.K. Basak та ін. За результатами їх досліджень встановлено, що механічне оброблення викликає пластичну деформацію, нагрівання та структурні перетворення в поверхневому шарі матеріалу оброблюваної деталі і супроводжується виникненням нерівномірних за глибиною та значенням залишкових деформацій та напружень. В залежності від того, яке явище є домінуючим (пластична деформація, нагрівання чи структурні перетворення), поверхневий шар може відрізнятися значеннями глибини та ступеня зміцнення, величиною і знаком залишкових напружень. Ці параметри, а також параметри шорсткості поверхні, в основному характеризують стан поверхневого шару і здійснюють суттєвий вплив на опір втомі деталей. Визначено, що найбільший вплив на опір втомі мають такі параметри шорсткості як найбільша висота профілю R_{max} , середній крок нерівностей профілю S_m (ДСТУ 2413-94, ДСТУ ГОСТ 25142:2009). При цьому зі збільшенням значення R_{max} опір втомі суттєво знижується, а при збільшенні значень S_m – підвищується. Це обумовлено тим, що значення найбільшої висоти профілю є максимальною відстанню між лінією виступів профілю та лінією западин профілю в межах базової довжини і тому є найбільшим концентратором напружень. На відміну від найбільшої висоти профілю, при збільшенні кроку нерівностей, напруження на дні рисок від оброблення зменшуються. Ступінь u_H та глибина h_H деформаційного зміцнення

поверхневого шару деталі також є важливими, тому що збільшення їх значень підвищує опір втомному руйнуванню. Але в цих дослідженнях не розглядалися питання впливу режимів оброблення деталей на їх опір втомі, що особливо стало актуальним в зв'язку використанням токарного оброблення при виготовленні відповідальних деталей та тенденцією заміни шліфування фінішною обробкою поверхонь точінням. Тому існує необхідність розробки методик визначення раціональних режимів фінішного токарного оброблення, що дозволяють отримати задані значення параметрів якості поверхневого шару відповідальних деталей та забезпечити необхідну їх циклічну довговічність і надійну експлуатацію.

Сформульовані мета і задачі досліджень.

У **другому розділі** представлено загальну методику проведення досліджень, наведено устаткування, інструменти, приведено методики дослідження механічних та втомних характеристик зразків, дослідження параметрів шорсткості, мікротвердості, мікроструктурного аналізу поверхневих шарів зразків та методику визначення експлуатаційних напружень в матеріалі деталі. Також в розділі наведено методику обробки результатів експериментальних досліджень, що включає методики моделювання технологічних параметрів, стиснення масивів інформації без втрати інформативності, порівняння досліджуваних об'єктів за їх параметрами, оптимізації технологічних параметрів.

При проведенні дисертаційних досліджень в якості оброблюваного матеріалу вибрано конструкційну леговану хромисту сталь 40Х ГОСТ 4543-71. З цього матеріалу виготовляють деталі, що піддаються вібраційним та динамічним навантаженням, до яких пред'являються вимоги підвищеної міцності, в'язкості та довговічності.

Для дослідження впливу технологічних умов токарного оброблення на зміну втомних характеристик використовували гладкі зразки круглого перерізу типу І згідно з ГОСТ 25.502-79 (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд зразку для випробувань на втому

Токарне оброблення виконували на токарному оброблюваному центрі HAAS ST20 різцем PVVNN 2525M-16Q з різальною пластинкою VBGW 160404T00815SE без охолодження з трьома режимами в діапазоні швидкостей різання від 80 до 180 м/хв. та подач – з 0,08 до 0,12 мм/об при глибині різання h 0,3 мм.

Випробування зразків на втому виконували на базі $N = 2 \cdot 10^7$ циклів при температурі 20°C за частоти обертання 2000 об/хв. на випробувальній машині МУИ-6000. При цьому використано схему навантаження у вигляді чистого згину при обертанні зразка.

Випробування на статичний розтяг з метою визначення механічних

характеристик матеріалу зразків виконували у відповідності з ГОСТ 1497-84. Для проведення досліджень на випробувальному стенді BISS Bi-01-103 розроблено відповідний ескіз зразку. Дослідження на розтяг проводили із постійною швидкістю переміщення активного рухомого захвату з записом діаграм деформування.

З метою визначення параметрів шорсткості досліджуваних зразків, що оброблені на різних режимах токарного оброблення в діапазоні швидкостей різання від 80 до 180 м/хв. та подач – з 0,08 до 0,16 мм/об при глибині різання h 0,3 мм, виконували необхідні вимірювання з використанням приладу MarSurf PS1.

Мікротвердість вимірювали у відповідності з ДСТУ ISO 6507-1:2007 за Вікерсом на мікротвердомірі ПМТ-3. Для оцінки глибини та ступеня зміцнення поверхні використовували метод вимірювання мікротвердості на косих шліфах.

З метою визначення впливу режимів токарного оброблення на мікроструктуру матеріалу зразків виконували металографічні дослідження на мікрошліфах з використанням скануючого електронного мікроскопу РЕМ 106И.

Для отримання необхідних адекватних математичних моделей обробку результатів експериментальних досліджень здійснювали методами багатфакторного регресійного аналізу даних. Значення фізико-механічних властивостей та хімічний склад матеріалів класифікаційної групи при отриманні математичних залежностей враховували за допомогою методики, що створена на основі методів багатовимірної статистичного аналізу.

Для розв'язання задачі оптимізації режимів токарного оброблення деталі, яка працює в умовах циклічних навантажень, з використанням в якості критерію максимальної продуктивності, що представляє собою багатовимірну задачу нелінійного програмування з множиною обмежень, використовували метод ковзаючого допуску.

З метою визначення експлуатаційних напружень в матеріалі деталі застосовували кінцево-елементний аналіз. Для його використано програмний комплекс FEMAP 10.2.0 фірми Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. Отримані результати кінцево-елементного аналізу є значенням одного із параметрів математичної моделі циклічної довговічності матеріалу деталі.

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень впливу режимів токарного оброблення на параметри шорсткості, мікротвердості, зміцнення та мікроструктури поверхневого шару зразків зі сталі 40X, механічних характеристик матеріалу при статичному розтягу, а також дослідження зразків на втому.

Дослідження мікрогеометрії виконували на спеціально підготовлених зразках зі сталі 40X, що оброблені при різних значеннях подачі й швидкості різання та при глибині різання 0,3 мм.

Аналіз отриманих результатів дослідження параметрів шорсткості показав, що найменші значення параметрів R_a , R_z та S_m (згідно з ДСТУ ГОСТ 25142:2009) відповідають режиму оброблення з $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм та R_{\max} – $V=120$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм. Найбільші значення параметрів R_a , R_{\max} отримано за режиму оброблення $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об,

$h=0,3$ мм, а $Rz - V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм та $Sm - V=180$ м/хв., $S=0,16$ мм/об, $h=0,3$ мм. Аналіз результатів наведених досліджень параметрів шорсткості підтверджують висновки про те, що найбільш інформативними і чутливими до зміни режимів різання є Sm та R_{max} .

Визначення металографічних властивостей поверхневого шару зразків здійснювали на мікрошліфах. Відповідно до значень мікротвердості поверхні $H_{нов}$ та основного матеріалу $H_{осн}$ розраховували ступінь зміцнення пластично деформованих поверхневих шарів u_n після токарного оброблення за різних режимів різання. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільші значення ступеня зміцнення пластично деформованих поверхневих шарів зразків відповідають режимам токарного оброблення $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм та $V=120$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм, а найменші – $V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм та $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм, та прослідковується закономірність збільшення даного показника зі збільшенням подачі і його незначне зменшення зі збільшенням швидкості різання. Дослідження впливу режимів токарного оброблення на мікроструктуру приповерхневих шарів мікрошліфів дозволило визначити їх фазовий склад. Отримані електронні фактографії показують, що для зразків з режимами оброблення $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=120$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=180$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм в приповерхневих шарах переважає фаза перліту в порівнянні з фазою фериту. Для зразків $V=120$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=120$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=180$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм фаза перліту менше виражена, а для зразків $V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм майже не проглядається. Отримані результати відповідають результатам металографічних досліджень.

Результати досліджень параметрів якості поверхневого шару зразків за показниками шорсткості, мікротвердості та мікроструктури дозволили встановити, що кожний із цих показників є чутливим до режиму токарного оброблення, які в подальшому впливають на циклічну довговічність деталей в умовах експлуатації при змінних навантаженнях.

Для дослідження механічних характеристик матеріалу при статичному розтягу виготовлено відповідні зразки зі сталі 40Х. При проведенні досліджень зразки встановлювали в гідравлічні самоцентруючі захвати випробувального стенду BISS Bi-01-103. Зразки розтягували при постійній швидкості руху захватів з визначенням залежності подовження зразку Δl під дією зусилля P .

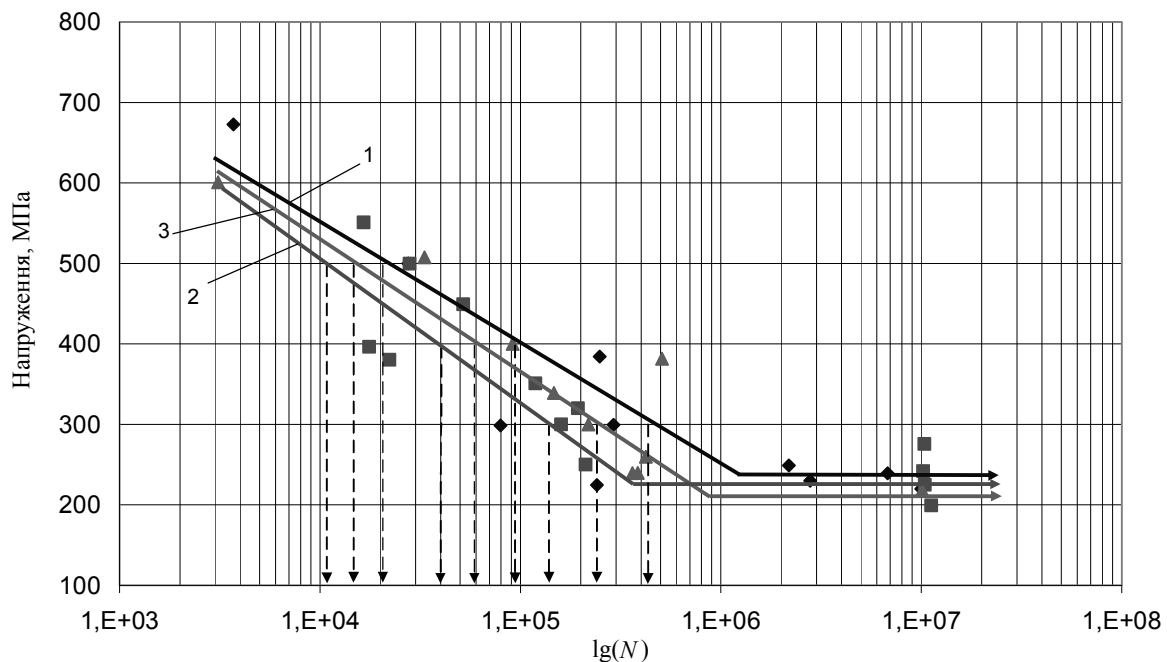
За результатами експериментальних досліджень визначено значення границі міцності σ_b , границі пропорційності $\sigma_{пц}$, границі текучості $\sigma_{тек}$, модуля пружності E , відносного звуження ψ та відносного видовження δ досліджуваного матеріалу, що дозволило визначити умови проведення досліджень його на втому.

З метою встановлення залежності циклічної довговічності матеріалу деталі від режимів різання при токарному обробленні, відповідно до розробленої методики експериментальних досліджень, виконано випробування зразків зі сталі 40Х на втому при кімнатній температурі. Випробування виконували до утворення макротріщини або повного руйнування зразку. За

результатами досліджень побудовано криві багатоциклової втоми зразків зі сталі 40Х при симетричному режимі навантаження з використанням одинарних логарифмічних координат (рис. 2).

Їх аналіз дозволяє зробити висновок про вплив режимів оброблення на довговічність зразків. Так, найменшу довговічність мають зразки, що оброблені за режиму $V = 80$ м/хв.; $S = 0,08$ мм/об; $h = 0,3$ мм, а найбільшу – за режиму $V = 120$ м/хв.; $S = 0,12$ мм/об; $h = 0,3$ мм. При цьому розбіжність між отриманими експериментальними значеннями кількості циклів до руйнування збільшується при зменшенні напруження циклу. Так, при напруженні 500 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблені за режиму $V = 80$ м/хв., $S = 0,08$ мм/об, $h = 0,3$ мм склала 11300 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V = 180$ м/хв., $S = 0,08$ мм/об, $h = 0,3$ мм – 15000 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V = 120$ м/хв.; $S = 0,12$ мм/об; $h = 0,3$ мм – 20500 циклів.

При напруженні 400 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблені за режиму $V = 80$ м/хв., $S = 0,08$ мм/об, $h = 0,3$ мм склала 40600 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V = 180$ м/хв., $S = 0,08$ мм/об, $h = 0,3$ мм – 59700 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V = 120$ м/хв., $S = 0,12$ мм/об, $h = 0,3$ мм – 95000 циклів.



◆ 1) $V = 120$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; $h = 0,3$ мм ■ 2) $V = 80$ м/хв; $S = 0,08$ мм/об; $h = 0,3$ мм ▲ 3) $V = 180$ м/хв; $S = 0,08$ мм/об; $h = 0,3$ мм

Рис. 2. Результати випробувань на втому зразків зі сталі 40Х, що оброблені за різних режимів різання

При напруженні 300 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблені за режиму $V = 80$ м/хв., $S = 0,08$ мм/об, $h = 0,3$ мм склала 150000 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V = 180$ м/хв., $S = 0,08$ мм/об, $h = 0,3$ мм – 290000 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V = 120$ м/хв., $S = 0,12$ мм/об, $h = 0,3$ мм – 430000 циклів.

Таким чином, максимальна розбіжність кількості циклів до руйнування при напруженні 300 МПа для зразків, що оброблені за режиму $V = 80$ м/хв.;

$S=0,08$ мм/об; $h=0,3$ мм та зразків, що оброблені за режиму $V=120$ м/хв.; $S=0,12$ мм/об; $h=0,3$ мм становила 2,9 рази. Отже, можна зробити висновок про суттєвий вплив режимів токарного оброблення на довговічність деталей та можливість її прогнозування і створення методики технологічного забезпечення.

В четвертому розділі розглядаються питання визначення раціональних режимів токарного оброблення матеріалу деталі, що забезпечують необхідну циклічну довговічність та найбільшу продуктивність виготовлення.

З метою визначення комплексного впливу стану поверхневого шару зразків на їх втомну міцність після токарного оброблення шляхом обробки результатів досліджень шорсткості та мікротвердості отримано математичні залежності R_{\max} , Sm та u_H від режимів різання:

$$R_{\max}(S, V) = 15,1 - 0,114 \cdot V + 189,3 \cdot S - 1,605 \cdot VS - 5,769 \cdot VS^2 + 0,011 \cdot V^2 S \quad (1)$$

$$Sm(S, V) = 94,834 - 0,111 \cdot V + 472,878 \cdot S - 6,907 \cdot VS + 21,887 \cdot VS^2 + 0,018 \cdot V^2 S \quad (2)$$

$$u_H(S, V) = 14,942 + 0,119 \cdot V + 1,268 \cdot S - 0,683 \cdot VS + 17,204 \cdot VS^2 - 0,09 \cdot V^2 S \quad (3)$$

Залежності (1-3) дійсні в такому діапазоні режимів різання: $V = 80 - 180$ м/хв.; $S = 0,08 - 0,12$ мм/об. Ці моделі є адекватними за F-критерієм Фішера при довірчій ймовірності 0,95.

Таким чином, комплексний показник стану поверхневого шару деталі можна представити у вигляді математичної моделі $P(S, V)$:

$$P(S, V) = \alpha_1 \left(\frac{(15,1 - 0,114 \cdot V + 189,3 \cdot S - 1,605 \cdot VS - 5,769 \cdot VS^2 + 0,011 \cdot V^2 S) - R_{\max}(S, V)_{\min}}{R_{\max}(S, V)_{\max} - R_{\max}(S, V)_{\min}} \right) + \\ + \alpha_2 \left(\frac{(94,834 - 0,111 \cdot V + 472,878 \cdot S - 6,907 \cdot VS + 21,887 \cdot VS^2 + 0,018 \cdot V^2 S) - Sm(S, V)_{\min}}{Sm(S, V)_{\max} - Sm(S, V)_{\min}} \right) + \\ + \alpha_3 \left(\frac{(14,942 + 0,119 \cdot V + 1,268 \cdot S - 0,683 \cdot VS + 17,204 \cdot VS^2 - 0,09 \cdot V^2 S) - u_H(S, V)_{\min}}{u_H(S, V)_{\max} - u_H(S, V)_{\min}} \right), \quad (4)$$

де α_1 , α_2 , α_3 – вагові коефіцієнти часткових складових математичної моделі (R_{\max} , Sm , u_H), що мають наступні значення: $\alpha_1 = -1,6$; $\alpha_2 = 1,4$; $\alpha_3 = 1,1$.

В цій моделі, складова $R_{\max}(S, V)$ врахована зі знаком «-», оскільки збільшення величини R_{\max} знижує опір втомі, а складові моделі $Sm(S, V)$ та $u_H(S, V)$ зі знаком «+», тому що їх зростання підвищує опір втомі.

На графіку залежності комплексного показника стану поверхневого шару деталі від режимів різання (рис. 3) видно, що на досліджуваному інтервалі швидкостей і подач при збільшенні подачі і швидкості різання комплексний показник якості поверхневого шару $P(S, V)$ зростає. Це дозволяє зробити припущення про відповідне зростання циклічної довговічності деталі.

На основі методики проведення експериментальних досліджень та обробки їх результатів, розроблено математичну модель циклічної довговічності деталі зі сталі 40X від режимів токарного оброблення та амплітудного напруження циклу:

$$N(S, V, \sigma) = e^k, \quad (5)$$

де $k = 14.437 + 0.0048V + 13.006S - 13.19\sigma + 0.002VS - 0.002V\sigma - 5.941S\sigma + 0.0000004V^2 + 2.929S^2 + 3.013\sigma^2$;

σ – напруження циклу, ГПа; V – швидкість різання, м/хв., S – подача, мм/об.

Залежність (5), відповідно до виконаних експериментальних досліджень, дійсна в таких межах зміни параметрів: $V=80-180$ м/хв., $S=0,08-0,12$ мм/об, $\sigma=0,225-0,67$ ГПа. Наведена модель є адекватною за F-критерієм Фішера при довірчій ймовірності 0,95.

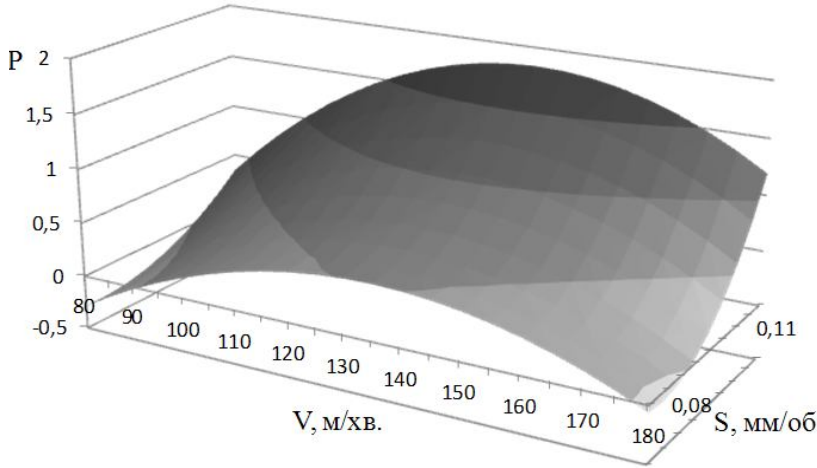


Рис. 3. Графік залежності комплексного показника якості поверхневого шару деталі від подачі та швидкості різання

різання від 80 до 180 м/хв. та глибині різання 0,3 мм збільшується при збільшенні як подачі, так і швидкості різання. При цьому вплив подачі має більш вагоме значення.

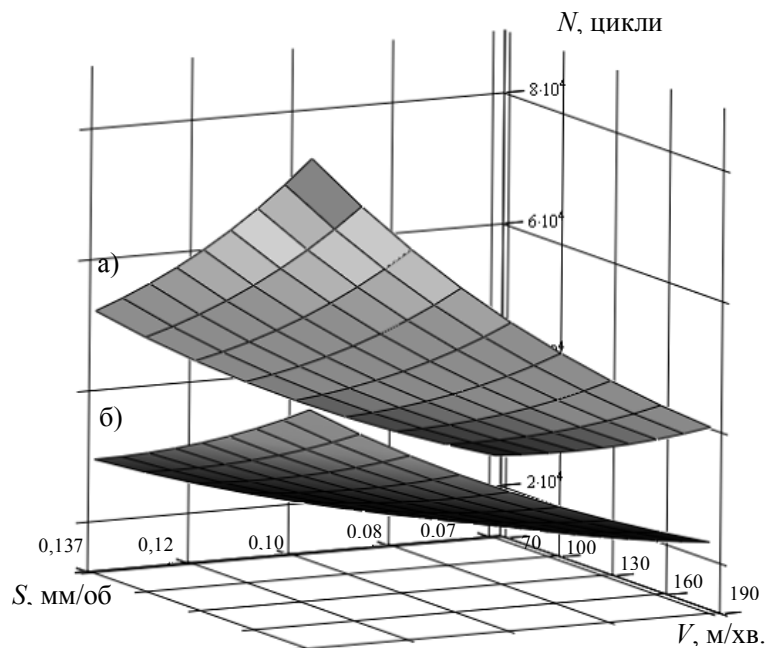


Рис. 4. Графіки залежності циклічної довговічності деталі від режимів оброблення та напруження циклу при:
а) $\sigma = 450$ МПа; б) $\sigma = 500$ МПа

Графіки залежності циклічної довговічності зразків із конструкційної сталі 40Х від напруження циклу та режимів оброблення наведено на рис. 4. Аналіз даної залежності показав, що циклічна довговічність при токарному обробленні зразків зі сталі 40Х для значення подач від 0,08 до 0,12 мм/об, швидкостей

Це відповідає отриманій математичній моделі комплексного показника якості поверхневого шару (4) деталі і дозволяє підтвердити достовірність математичної моделі циклічної довговічності (5) для сталі 40Х.

При розв'язанні задачі технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності деталей в якості критерію оптимальності вибрано максимальну продуктивність процесу фінішного токарного оброблення у вигляді:

$$f(S, V) = \frac{1000 \cdot S \cdot V}{\pi \cdot D}, \quad (6)$$

де S – повздовжня подача, мм/об, V – швидкість різання, м/хв.; D – діаметр оброблюваної поверхні, мм.

Визначення раціональних значень подачі та швидкості різання, здійснювали із області допустимих рішень, що задана обмеженнями по подачі та швидкості різання, допустимим силі та потужності різання, точності оброблення, стійкості інструменту, шорсткості обробленої поверхні, а також по циклічній довговічності деталі. Дані обмеження встановлено за фактичними характеристиками складових технологічної обробної системи і умовами експлуатації деталі, з урахуванням яких загальний вигляд математичної моделі розв’язання задачі оптимізації режимів токарного оброблення деталей зі сталі 40Х представлено наступним чином:

$$\begin{aligned} S_{\min} &\leq S \leq S_{\max}; \\ \frac{\pi D_0 n_{\min}}{1000} &\leq V \leq \frac{\pi D_0 n_{\max}}{1000}; \\ P_{\max \text{ о.з.}} &\geq P_x = 10 C_{Px} h^{x_{Px}} S^{y_{Px}} v^{n_{Px}} K_{Px}; \\ \max f(S, V) \text{ при } N_{\text{об}} \eta &\geq \frac{10 C_{Pz} h^{x_{Pz}} S^{y_{Pz}} v^{n_{Pz}} K_{Pz}}{1000 \cdot 60}; \\ 0,5 \cdot TD &\geq \Delta_{\Sigma}; \\ T &\leq \left(\frac{C_V K_V}{V h^x S^y} \right)^{1/m}; \\ Ra_{\text{необ}} &\geq Ra_{\text{розр}}; \\ N_{\text{необ}} &\leq N_{\text{розр}} \end{aligned} \quad (7)$$

Для розширення діапазону використання математичної моделі циклічної довговічності (5) на деталі, що виготовляються із конструкційних матеріалів групи легованих хромистих сталей, до якої відноситься сталь 40Х, застосовано методику врахування характеристик матеріалу даної групи для отримання відповідної математичної моделі циклічної довговічності деталі. Це дало можливість на основі математичної моделі циклічної довговічності одного матеріалу класифікаційної групи отримати відповідні моделі для множини матеріалів без проведення довготривалих та коштовних експериментальних досліджень.

З метою визначення раціональних режимів токарного оброблення деталей, які працюють в умовах знакозмінних навантажень, що забезпечують необхідну циклічну довговічності деталі та максимальну продуктивність її виготовлення розроблено відповідне програмне забезпечення на мові програмування С#.

У **п'ятому розділі** наведено методичні рекомендації з визначення раціональних умов токарного оброблення деталей на етапі технологічної підготовки виробництва з метою технологічного забезпечення необхідного значення циклічної довговічності деталей за максимальної продуктивності їх виготовлення з урахуванням реальних умов експлуатації.

Згідно з розробленими рекомендаціями після аналізу конструкції деталі та

умов її експлуатації, запропоновано визначати максимальні напруження в матеріалі деталі при експлуатації шляхом виконання кінцево-елементного аналізу в середовищі програмного комплексу FEMAP 10.2.0.

Як приклад дослідження умов експлуатації з метою визначення місця локалізації та значень напружень, які виникають в матеріалі деталі, розглядали вал поворотного механізму зі сталі 40Х ГОСТ 4543-71, що працює в умовах знакозмінних навантажень, які задавали шляхом прикладання пари сил. Загальний вигляд напружено-деформованого стану валу за експлуатаційних умов представлено на рис. 5.

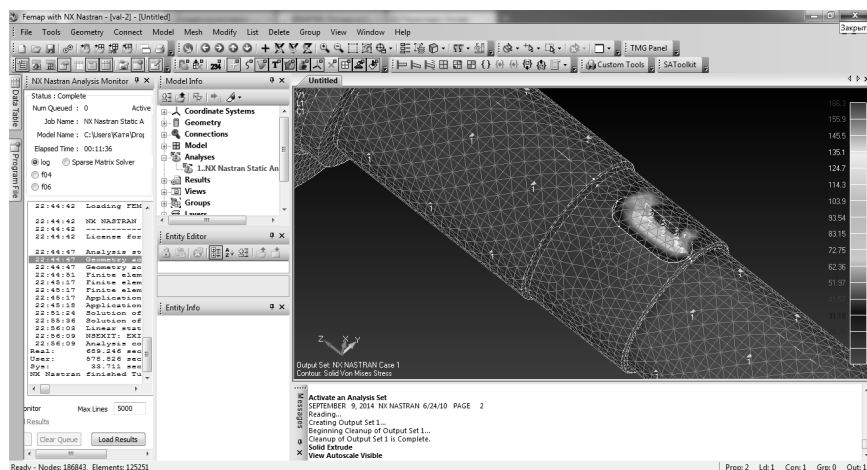


Рис. 5. Загальний вигляд напружено-деформованого стану валу за експлуатаційних умов

В правій частині графічного інтерфейсу програми представлено діаграму, що відображає значення еквівалентних напружень за гіпотезою Мізеса для об'ємних кінцевих елементів. З рис. 5 видно, що найбільші напруження на циліндричній поверхні складали 400 МПа.

Визначення раціональних технологічних умов процесу токарного оброблення деталі за математичною моделлю (7) виконували за допомогою розробленої програми. Після введення необхідних початкових даних у вікні програми (рис. 6) та подальшого вибору матеріалу різальної крайки

Програма оптимізації режимів токарного оброблення

Різальний інструмент		Характеристики верстату	
Головний кут в плані	72.5	Максимальна потужність шпинделя	14.9 кВт
Допоміжний кут	72.5	Коефіцієнт корисної дії головного приводу верстату	0.8
Передній кут	-14	Максимальна частота обертання шпинделя	4000 об/хв
Кут нахилу головного леза	5	Мінімальна частота обертання шпинделя	400 об/хв
Радіус вершини різця	0.4 мм	Максимальне допустиме значення подачі, S max	6 мм/об
Період стійкості інструменту	60 хв	Мінімальне допустиме значення подачі, S min	0.005 мм/об
Відносний розмірний знос різця	0.7 мкм/км	Найбільша піддатливість системи	0.04 мм/кН
		Найменша піддатливість системи	0.035 мм/кН
		Максимально допустиме зусилля по осі X	0.1 кН

Оброблювана поверхня		Складові сумарної похибки	
Діаметр деталі	38 мм	Похибка установки заготовки в пристосування	5 мкм
Шорсткість поверхні	1.25 мкм	Похибка налашки технологічної системи	4 мкм
Діаметр заготовки до обробки	40 мм		
Довжина оброблюваної поверхні	30.5 мм		
Кількість деталей в партії	25 шт		

Початковий режим оброблення	
S	0.008 мм/об
h	0.1 мм
V	108 м/хв
Експлуатаційне напруження	0.4 ГПа
Необхідна циклічна довговічність	85000 циклів

Розрахувати

Рис. 6. Головне вікно програми визначення раціональних режимів токарного оброблення з введеними початковими даними

інструменту, матеріалу деталі та точності оброблюваної поверхні отримано результатами розв'язання задачі оптимізації (рис. 7).

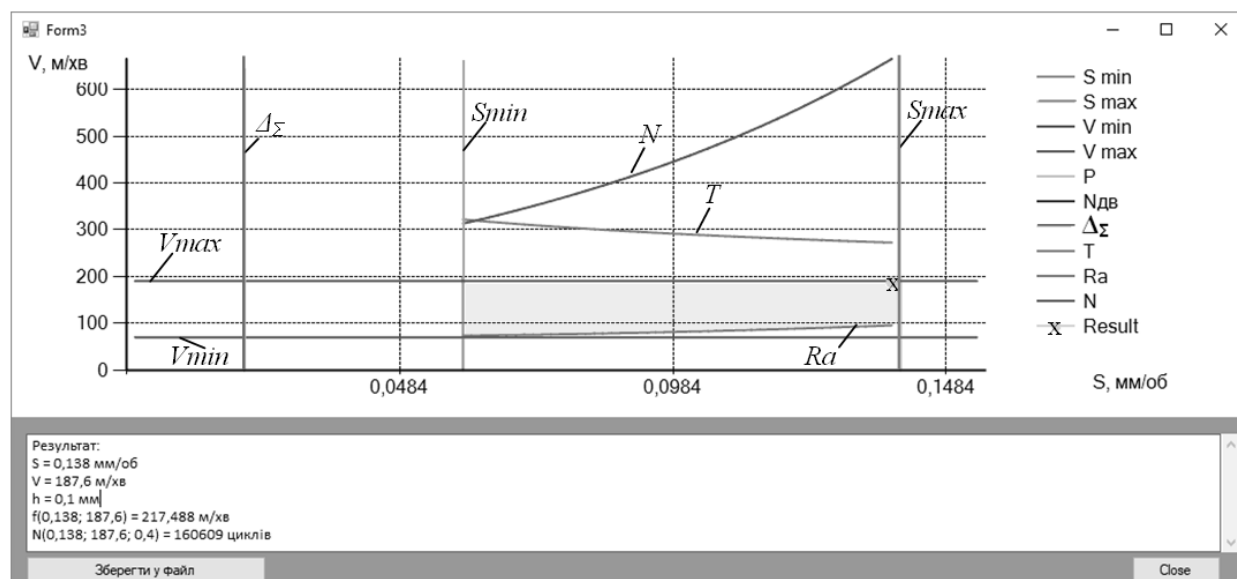


Рис. 7. Вікно з результатами розв'язання задачі оптимізації для деталі «Вал»

Таким чином, за рахунок використання, розроблених алгоритму та програми оптимізації режимів токарного оброблення методом ковзаючого допуску та встановленому експлуатаційному напруженні $\sigma = 400$ МПа в матеріалі деталі визначено раціональний режим токарного оброблення деталі «Вал» ($S = 0,138$ мм/об; $V = 187,6$ м/хв.; $h = 0,1$ мм), що забезпечують необхідну циклічну довговічність (не менше $N = 16 \cdot 10^4$, що більше заданого розробниками ресурсу роботи деталі) при її експлуатації та максимальну продуктивність виготовлення (за умови мінімізації часу оброблення).

Наведений приклад показує, що запропонована методика дозволяє визначити раціональні умови токарного оброблення, які забезпечують необхідне значення циклічної довговічності за максимальної продуктивності її фінішного токарного оброблення.

За даною методикою є можливість прогнозувати кількість циклів навантаження при експлуатації деталі до її руйнування (ресурс її роботи), що дозволить уникнути аварійних ситуацій внаслідок раптового долому деталі.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача технологічного забезпечення необхідних значень циклічної довговічності матеріалу деталей шляхом встановлення закономірностей впливу токарного оброблення на стан поверхневого шару деталей та визначення його раціональних режимів.

1. За результатами аналізу параметрів, що характеризують опір втомі деталей при циклічних навантаженнях, аналізу впливу стану поверхневого шару і технологічних умов механічного оброблення деталей на їх опір втомі при експлуатації в умовах знакозмінних навантажень та аналізу методів визначення

циклічної довговічності матеріалу деталей розроблена методика проведення експериментальних досліджень параметрів якості поверхневого шару та характеристик опору втомі, що дозволяє визначити взаємозв'язок втомних характеристик з технологічними умовами оброблення.

2. Результати експериментальних досліджень параметрів якості дозволили встановити, що режими токарного оброблення суттєво впливають на формування мікрогеометрії поверхні, мікротвердості та фазового складу приповерхневих шарів досліджуваних зразків. Встановлено, що на інтервалі дослідження ($V = 80 - 180$ м/хв.; $S = 0,08 - 0,12$ мм/об) при збільшенні подачі і швидкості різання комплексний показник стану поверхневого шару, що характеризується параметрами шорсткості R_{\max} , S_m та ступенем деформаційного зміцнення σ_H , зростає. Це дозволяє зробити припущення про відповідне зростання циклічної довговічності та на можливість забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару відповідальних деталей шляхом встановлення відповідних режимів їх оброблення.

3. Результати експериментальних досліджень на втому дозволили створити математичну модель циклічної довговічності деталі, що враховує вплив режимів токарного оброблення та напруження циклу в матеріалі деталі при експлуатації. Аналіз результатів моделювання показав, що циклічна довговічність при токарному обробленні зразків зі сталі 40Х на інтервалі дослідження зростає при збільшенні як подачі, так і швидкості різання, при цьому вплив подачі має більш вагоме значення. Крім того, розроблена модель дозволяє за запропонованою методикою отримувати відповідні математичні моделі циклічної довговічності для множини матеріалів класифікаційної групи конструкційних легированих хромистих сталей з врахуванням їх характеристик. Це суттєво спрощує процес створення таких моделей та дозволяє зменшити витрати на проведення експериментальних досліджень.

4. Створена математична модель процесу фінішного токарного оброблення, яка включає в якості цільової функції максимальну продуктивність процесу та множину обмежень по подачі і швидкості різання, допустимим силі та потужності різання, точності оброблення, стійкості інструменту, шорсткості обробленої поверхні та по циклічній довговічності деталі, дозволяє за обраним методом нелінійної оптимізації визначити раціональний режим фінішного токарного оброблення з врахуванням фактичних характеристик складових технологічної обробної системи і умов експлуатації деталі.

5. Алгоритми і програми оптимізації, що представлені в роботі, дозволяють розв'язати багатовимірну нелінійну оптимізаційну задачу за критерієм максимальної продуктивності процесу фінішного токарного оброблення деталі та обмеженнями, що враховують її циклічну довговічність.

6. З метою оцінювання параметрів, що характеризують опір втомі матеріалу деталі, запропоновано визначати місце локалізації його найбільших напружень шляхом виконання комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі, яка піддається навантаженням змінним за знаком та величиною.

7. Розроблені методичні рекомендації технологічного забезпечення необхідного значення циклічної довговічності деталей при їх фінішному токарному обробленні дозволяють визначити його раціональні режими за критерієм максимальної продуктивності.

8. Результати практичного застосування методики технологічного забезпечення необхідного значення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні на прикладі деталі типу «Вал» дозволили визначити раціональний режим різання ($S = 0,138$ мм/об; $V = 187,6$ мм/хв.; $h = 0,1$ мм), який забезпечує циклічну довговічність деталі не менше $N = 16 \cdot 10^4$, що більше заданого розробниками ресурсу роботи деталі при її експлуатації, та підвищити продуктивність її виготовлення в 1,2 рази.

9. Результати дисертаційних досліджень пройшли практичну апробацію на ПАТ «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики» (м. Київ), а також впроваджені в навчальний процес на кафедрі виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні навчальних дисциплін «Матеріалознавство», «Технологія приладобудування» та «Моделювання технологічних параметрів».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Барандич К.С. До питання визначення оброблюваності конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Збірник наукових праць «Прогресивні технології та прилади». – 2011. – №1. – С. 14-26. *Автором запропоновано методику, що дозволяє визначати відносні оброблювані властивості конструкційних матеріалів.*

2. Барандич К.С. Методика визначення раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2011. – Вип. 41. – С. 110-119. *Автором сформульовано методику врахування властивостей оброблюваних матеріалів при призначенні режимів різання.*

3. Барандич К.С. Вибір раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – 2011. – Вип. 10. – с.64-72. *Автором запропоновано використання методики визначення оброблювальних властивостей конструкційних матеріалів з метою призначення раціональних режимів їх оброблення.*

4. Barandich C.S. The limit of endurance, as the main indicator of operational properties details of devices / C.S. Barandich, S.P. Vysloukh, O.V. Voloshko // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Зб. наук. пр. – 2014. – №786. – с. 35-39. *Автором розроблено математичну модель границі витривалості матеріалу деталі після механічного оброблення.*

5. Барандич К.С. Створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування,

будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Редколегія: С.Ф. Пічугін (головний редактор) та ін. – Вип. 2 (41). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – с. 228-232. *Автором розроблено методику визначення напружено-деформованого стану деталей при експлуатації.*

6. Барандич Е.С. К вопросу технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей приборов / Е.С. Барандич, С.П. Вислоух // Справочник. Инженерный журнал.–2015. – № 2. – С. 34-38. (іноземне видання) *Автором обґрунтовано необхідність створення науково обґрунтованої методики призначення раціональних режимів механічного оброблення, що направлена на забезпечення експлуатаційних властивостей деталей.*

7. Барандич К.С. Влияние параметров шерсткости обработанных поверхностей на характеристики опоры в томе деталей / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.І. Паткевич // Вісник ЧДТУ. – 2015. – № 1. – С.116–122. *Автором проведено дослідження параметрів шерсткості деталей після токарного оброблення та встановлено їх вплив опір втомі.*

8. Барандич Е.С. Исследование влияния режимов механической обработки на усталостные характеристики инструментальных легированных сталей / Е.С. Барандич, Ю.А. Федоран, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк, С.П. Вислоух, С.К. Аврамчук // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – 2015. – №36.–С.38-43. *Автором проведено дослідження втомних характеристик сталей в залежності від режимів їх оброблення.*

9. Barandich C.S. The dependence of the physical and mechanical properties of tool steel alloys from the type of machining / C.S. Barandich, V.S. Antonyuk, V.M. Volkogon, S.P. Vysloukh, S.K. Avramchuk, Y.A. Fedoran // International journal for science and innovations for the industry, Innovations in discrete productions. – Sofia, 1/2015, p.25-27. (іноземне видання) *Автором проведено аналіз впливу технологічних параметрів механічного оброблення на фізико-механічні властивості сталей.*

10. Барандич Е.С. Влияние технологических параметров механической обработки на структурное состояние поверхностных слоев и сопротивление усталости стали ХВСГ / Е.С. Барандич, Ю.А. Федоран, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк, С.П. Вислоух, Д.А. Котляр, А.В. Кравчук // Резание и инструмент в технологических системах. – 2015. – №85. – С. 8-16. (Ulrich's Periodicals Directory) *Автором виконано обробку результатів експериментальних досліджень на втому з побудовою кривих втомі.*

11. Барандич К.С. Методика визначення циклічної довговічності матеріалу деталей, що працюють в умовах змінних навантажень / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – №4(75). – С.30-37. (Google Scholar, WorldCat, BASE, eLibrary) *Автором запропоновано методику врахування реальних характеристик конструкційних матеріалів при визначенні циклічної довговічності деталей.*

12. Catherine Barandych Lathe Turning Mode Optimization for Parts Working under Conditions of Cyclic Loading / Catherine Barandych, Sergey Vyslouh, Victor

Antoniuk, Oleksandr Tymoshenko, Viktor Koval // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2016. – Vol. 2, No. 2. – pp. 53–60. (Google Scholar, Index Copernicus International) *Автором отримано теоретико-експериментальну залежність циклічної довговічності деталей зі сталі 40X та розроблено математичну модель оптимізації процесу токарного оброблення*

13. Пат 62914 Україна, МПК В23Q 15/00/ Спосіб неруйнівного визначення оброблюваності конструкційних матеріалів та оброблювальних властивостей інструментальних матеріалів [Текст] / Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С. (Україна); заявник та патентовласник Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С.. – № u201100718; заявл. 24.01.2011; опубл. 26.09.2011, Бюл. №18. – 4с.:іл. *Автором виконано аналіз аналогів запропонованого способу.*

14. Пат. 87048 Україна, МПК G01N 3/58. Спосіб визначення відносної оброблюваності матеріалів [Текст] / Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С., Філіпова М.В. (Україна); заявник та патентовласник Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С., Філіпова М.В.. – № 201306455; заявл. 24.05.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. №2. – 5с.:іл. *Автором виконано вдосконалення структурної схеми визначення відносної оброблюваності матеріалів.*

15. Барандич К.С. Методика технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей приборов при лезвийной обработке / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 04–08 июня 2012 г., г.Ялта.– Киев АТМ Украины, 2012.– с. 32-33.

16. Барандич Е.С. Технологическое обеспечение необходимых значений эксплуатационных свойств деталей приборов / Е. С. Барандич, С. П. Вислоух // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Достижения молодых учёных в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» [Текст]+ [Электронный ресурс] / под ред. И.А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2012. – с. 37-38.

17. Барандич Е. С. Математическое моделирование параметров эксплуатационных свойств деталей приборов / Е.С. Барандич, С.П. Вислоух // Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий: Материалы Международной научно-практической конференции (осенняя сессия), Сочи, 1–7 октября 2013 г. / Соч. гос. ун-т; Науч. ред.: Ю.И.Дрейзис, И.Л.Макарова, А.Р. Симонян, Е.И. Улитина. – Сочи, 2013. –с. 5.

18. Барандич Е. С. Влияние механической обработки деталей на их усталостную прочность / Е.С. Барандич, С.П. Вислоух // Майбутній науковець – 2013: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. 6 груд. 2013р., м. Сєверодонецьк. / [укл.: Тарасов В.Ю.]. – Сєверодонецьк: [Технол. ін-т Східноукр. нац. Ун-ту ім. В. Даля (м. Сєверодонецьк)], 2013. – с. 57-59.

19. Барандич Е. С. Анализ влияния качества поверхностного слоя деталей после механической обработки на сопротивление их усталостному разрушению / Е. С. Барандич, С. П. Вислоух // Приборостроение-2014: материалы 7-й Международной научно-технической конференции (19–

21 ноября 2014 года, Минск, Республика Беларусь)/ ред. колл.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 248-250.

20. Барандич К.С. Вплив параметрів шорсткості поверхні на опір втоми деталей / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.І. Паткевич, В.С. Антонюк // Збірник наукових праць III-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», 2–6 лютого 2015 р., м. Львів. – Львів: Вид-во ЛП, 2015. – с. 18-19.

21. Барандич Е.С. Оптимизация режимов токарной обработки при технологическом обеспечении циклической долговечности деталей / Е.С. Барандич, С.П.Вислоух, В.С. Антонюк// Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції 31 травня – 3 червня 2016 року / за заг. ред. В.Д. Ковальова, д-ра техн. наук – Краматорськ : ДДМА, 2016. – с. 12-13.

22. Barandych K.S. Analysis of surface quality and its impact on fatigue life of turned components / K.S. Barandych, S.P. Vysloukh // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 16-17 травня 2017р., м.Київ, ПБФ, НТУУ «КПІ». – 2017.– с.55-56.

23. Барандич К.С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво (МОМ – 2017): матеріали тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 01-03 листопада 2017 р.): / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.]; відп. за вип.: Сапон Сергій Петрович. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – с. 88-89.

АНОТАЦІЯ

Барандич К.С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена питанням технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень шляхом оптимізації режимів токарного оброблення. Представлено аналіз впливу якості поверхневого шару деталей, що працюють під дією циклічних навантажень, на їх втомні характеристики. Проведено втомні експериментальні дослідження, за результатами яких створено математичну модель циклічної довговічності матеріалу деталі від режимів токарного оброблення та напруження циклу. Розроблено математичну модель процесу токарного оброблення деталей, що працюють в умовах циклічно змінних навантажень. Представлена задача оптимізації, розв'язок якої виконували за допомогою використання методу ковзаючого допуску. Розроблено методичні рекомендації з визначення раціональних режимів фінішного токарного оброблення деталей з метою технологічного забезпечення необхідних значень

циклічної довговічності деталей при максимальній продуктивності їх токарного оброблення з урахуванням реальних умов експлуатації. Основні результати дисертаційних досліджень апробовані на ПАТ «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики» (м. Київ).

Ключові слова: технологічне забезпечення, опір втомі, циклічна довговічність, стан поверхневого шару, токарне оброблення, багатовимірний статистичний аналіз.

АННОТАЦИЯ

Барандич Е.С. Технологическое обеспечение циклической долговечности деталей при их токарной обработке. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена вопросам технологического обеспечения необходимой циклической долговечности материала деталей, работающих в условиях циклических нагрузок путем оптимизации режимов токарной обработки. Представлен анализ влияния качества поверхностного слоя деталей, работающих под действием циклических нагрузок, на их усталостные характеристики. Проведены усталостные экспериментальные исследования, по результатам которых создана математическая модель циклической долговечности материала детали от режимов токарной обработки и напряжения цикла. Разработана математическая модель процесса токарной обработки деталей, работающих в условиях циклически переменных нагрузок. Представленная задача оптимизации, решение которой выполняли с помощью использования метода скользящего допуска. Разработаны методические рекомендации по определению рациональных режимов финишной токарной обработки деталей с целью технологического обеспечения требуемых значений циклической долговечности деталей при максимальной производительности их токарной обработки с учетом реальных условий эксплуатации. Основные результаты диссертационных исследований апробированы на ОАО «Научно-производственное объединение «Киевский завод автоматики» (г. Киев).

Ключевые слова: технологическое обеспечение, сопротивление усталости, циклическая долговечность, состояние поверхностного слоя, токарная обработка, многомерный статистический анализ.

SUMMARY

Barandych K.S. Technological providing of fatigue life of details at their turning processing. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical science degree in specialty 05.02.08 «Engineering techniques». – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to questions of technological assurance of fatigue life of the material of parts working in conditions of cyclic loads by optimization of their cutting parameters. The analysis of the influence of the surface layer of the parts operating under the influence of cyclic loads on their fatigue characteristics is presented. An overview of the methods for determining fatigue life, which showed limited information about the mathematical dependences of fatigue life of the part's material from the technological conditions of its production, is complete.

In carrying out dissertation researches the steel 40X ГОСТ 4543-71 was chosen as a processed material. Parts that operate under vibration and dynamic loads, to which requirements of increased durability, viscosity and durability are imposed, are usually made from this material.

An experimental study of the surface layer's parameters of the samples as roughness, microhardness and microstructure was carried out. The results allowed to establish that each of these parameters is sensitive to cutting parameters, which in the future affect on the fatigue life of parts under operating variable loads conditions.

The mathematical dependences R_{\max} , S_m and u_H from the turning cutting condition were obtained in order to determine the complex influence of the surface layer quality of the samples on their fatigue strength after turning by processing the results of roughness and microhardness studies. These mathematical dependences have allowed us to create a complex index of the surface layer's state of the samples $P(S, V)$, which increases with increasing feed rate and cutting speed on the studied range. This allows us to make an assumption about the corresponding increase of fatigue life.

In order to study the influence of the technological conditions of the turning process on the change of the fatigue characteristics of the part's material, samples of a round section of type I (GOST 25.502-79) were used. The turning process was performed on a turning center HAAS ST20 with a cutting tool PVDNN 2525M-16Q with a cutting plate VBGW 160404T00815SE without cooling in the range of cutting speeds from 80 to 180 m/min. and feeds – from 0.08 to 0.12 mm/rev at a cutting depth of 0.3 mm.

Fatigue tests were being carried on the base of $N = 2 \cdot 10^7$ cycles at a temperature of 20 ° C with a rotational frequency of 2000 rpm. on the test machine МУИ-6000. In this case, the load diagram pure bend in rotation of the sample according to GOST 25.502-79 was used.

The mathematical dependence of the fatigue life of the 40X steel part from cutting conditions and cycle stress was developed on the results of experimental studies on fatigue and its processing. Analysis of this dependence showed that the fatigue life of turning finished specimens from steel 40X for feed rate values from 0.08 to 0.12 mm/rev, cutting speed from 80 to 180 m/min and the depth of cutting 0.3 mm increases with increasing both feed rate and cutting speed. In this case, the effect of feed rate is more significant. In this case, influence of the feed rate is more significant. This corresponds to the obtained mathematical model of the complex index of the part's surface layer and allows confirming the reliability of the fatigue life mathematical model for the 40X steel part.

The productivity of the finishing turning process was used as an optimality

criterion in solving the task of technological support fatigue life of parts. The determination of rational values of cutting speed and feed rate was carried out from the range of acceptable solutions. This range is defined by a plurality of constraints on the turning process, and also includes an operating limitation on the number of cycles before fatigue failure of the part. Thus, a turning process mathematical model of the 40X steel parts was created.

To extend the using range of the mathematical model of fatigue life on the parts, which are made from structural materials of alloyed chromium steels group, which includes steel 40X, the method of taking into account the characteristics of any material of this group is used to obtain the appropriate mathematical model of fatigue life. This allows obtaining appropriate mathematical models for any material based on the mathematical model of fatigue life for one material of the classification group without carrying out additional, long-term and expensive experimental studies.

In order to solve the task of optimizing the parts cutting conditions, the corresponding software was developed in the C # programming language.

The finite-element analysis in the framework of the software complex FEMAP 10.2.0 was carried out to determine the maximum stresses in the material of the component under conditions of its operation.

With the purpose of technological providing the necessary fatigue life of the part, taking into account the real conditions of its operation for the maximum productivity of the finishing turning process, the methodical recommendations for determining the rational parts cutting conditions at the phase of technological preparation of production are given.

As an example of using the proposed methodical recommendations, the task of the technological support of fatigue life of the "Swing mechanism shaft" part (steel 40X GOST 4543-71), which operates under cyclic loading conditions, was solved.

The main results of the dissertation researches are tested on the example of parts, which are manufactured at PJSC "RPA " Kyiv Automatics Plant", Kyiv.

Key words: technological support, fatigue strength, fatigue life, state of the surface layer, turning process, multidimensional statistical analysis.